

제주대학교 Panorama식 ^{60}Co 감마선 조사시설의 선량분포 평가

문성애 · 박재우

제주대학교 방사선응용과학연구소

Evaluation of the Radiation Dose Distribution of the CNU Panoramic Cobalt-60 Gamma Irradiation Facility

Seong-Ae Moon and Jae-Woo Park

*Applied Radiological Science Research
Institute, Cheju National University*

Abstract

Co-60 irradiation facilities are used for irradiation purposes. Suitable dosimetry procedures must be carried out in order to establish facility operational parameters, such as dose uniformity and maximum and minimum dose positions prior to routine processing.

A detailed dose mapping of the irradiation can be performed using dosimeters. Because the source is a cylinder source and the scattered radiation from the concrete walls, ceiling and floor of the exposure room had to be taken into account, there was difference between the data on measurements and the result of calculation. So best estimates of the dose rates were based on measurements.

The radiation dose distribution of a panoramic irradiation chamber with Co-60 gamma source of 400 TBq(10,800Ci) was

performed using the chemical dosimeter of FeSO_4 solution, the $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ thermoluminescence pallets, ionization chamber and MOSFET dosimeter.

The measured data are radiation absorbed doses at different exposed times and at different distances from the source. Regard as a measured data of dose using the ionization chamber is correct, both types of dosimeters have shown fairly good linearities between the dose and the exposed time as long as the dosimeters are within the measurable limits. The chemical dosimeter produced inaccurate results over 600 Gy because the Fricke solution had become saturated. In general, it produces lower values than the ionization chamber.

It is found with using the lead shield that both types of dosimeters have shown incorrect results below 40 Gy.

And compared to the data of the MOSFET used in medical applications such as dose verification in radiation therapeutic and diagnostic applications for the more objective estimation, it shows higher values than the ionization chamber.

By combination of placing the lead shields and increasing the difference between the source and the object being irradiated, it is found that the dose rate range of the irradiation chamber is 0.37~1.628 Gy/hr.

Key words : Radiation dose distribution, Co-60 gamma source, TLD, Chemical dosimeter, ionization chamber, MOSFET dosimeter

서론

감마선 및 전자선 등 방사선조사는 다양한 분야에 이용되어지고 있는데 특히 ^{60}Co 을 이용한 감마선조사는 동·식물 유전자의 기능 규명을 통한

농작물 및 관상식물의 돌연변이 신품종 개발(W.Y. Park 등 2002, A. Dodbiba 등 2003), 식품 멸균처리(Meixu Gao, 2003), 농·수산물의 저장성 향상(J. Farkas, 1998) 및 방사선 조사로 인한 전자제품의 성능 변화 연구(C.C.Yui 등 2003) 등에 많이 활용되고 있으며 최근에는 방사선 방어제 및 민감제와 항암제 등 기능성 물질의 개발(R. Arora 등, 2005, Jie-Young Song 등, 2003)에도 널리 이용되고 있으며, 앞으로도 방사선 조사 분야가 점점 확대될 것으로 예상된다.

이러한 다목적 방사선 조사시설의 경우 조사할 시료와 목적에 따라 조사할 방사선량의 범위가 다르고 넓기 때문에 이에 따라 조사 과정에 앞서 선량의 균일성이나 최대, 최소 선량 위치와 같은 조사시설 전체의 정확한 선량평가가 수행되어야 한다(K, Farah 등 2005).

따라서 본 연구는 2004년 2월 제주대학교에 설치된 방사능이 400 TBq (10,807 Ci) Co-60 감마선 조사실의 여러 가지 인자인 선량조절용 납 차폐체와 선원중심과 조사지점 사이의 이격거리를 변수로 하여 실제로 측정된 방사선량을 기준으로 하여 정확한 선량을 분포지도를 작성하고자 하였다.

선량측정에는 고선량 측정에 적합한 한국원자력연구소에서 개발한 KCT-300 소자와 자체 제조한 화학선량계($FeSO_4$) 용액, 전리함 및 동물 세포와 같은 생체 조직이나 마우스 등의 조사시에 국부적 표면의 선량 측정에 유리한 MOSFET 선량계로 측정된 각각의 결과를 비교 검토하여 선원으로부터 거리에 따른 선량변화 함수를 도출하였다.

재료 및 방법

1. 방사선 조사시설의 구조

제주대학교 방사선응용과학연구소는 2004년 2월 방사능이 400 TBq (10,807 Ci)인 ^{60}Co 선원을 도입하여 선원주위 다양한 크기의 대상을 조사할 수 있고, 모든 방향에서 방사선조사가 가능한 파노라마 형의 다목적 감마선조사시설을 구축하였다.

방사선조사시설은 조사실과 운전제어실로 구성된다. 그림 1은 각각 조사시설의 평면구조와 수직 단면을 보인 그림이다. 조사실은 직육면체 구조이고, 3200 x 4200 x 2700 mm (D x W x H)의 용적을 가지고 있으며 선원은 조사실의 중앙에서 세로방향으로 약 500 mm 정도 떨어진 곳에 위치한다. 제어실에서 조사실로 통하는 출입통로는 감마선이 산란하여 빠져 나오는 것을 막기 위하여 "Γ"자로 꺾어진 차폐벽 구조로 하고 납으로 제작된 차폐문을 두 군데 설치하였다. 조사실과 제어실 사이의 벽에는 납유리 창을 설치하여 조사실 내부의 상황과 선원의 위치를 직접 눈으로 확인할 수 있게 한다.

선원을 차폐용 납용기에 저장하는 건식형으로, 직경이 11 mm이고 길이가 400 mm인 Co-60 선원을 저장용기에 봉입한 상태이다. 이 저장용기는 두께가 25 cm인 납차폐체로 제작된 원주형 용기이고 외부는 스테인리스로 피복하였다. 이 선원봉은 plug 형태의 선원홀더에 수용되어 있다. 조사를 하지 않을 때 선원홀더는 선원저장용기에 삽입된 상태로 있고, 조사시에는 선원 취급 케이블을 통하여 저장용기로부터 인출되어 guide tube를 따라 상하 축 방향으로 직선 이동한다. 이 때 선원 취급 케이블은 제어실에 있는 구동모터에 의해 제어된다.

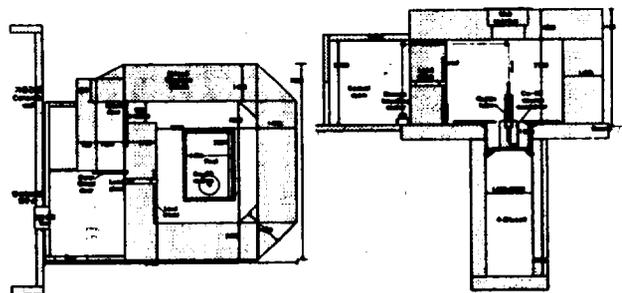


Fig 1. The plane and vertical view of the Co-60 gamma irradiation facility.

현재 조사실 내부의 선원으로부터의 최대 거리는 2.5 m 미만이다. 따라서 선원과 시료간의 이격거리만으로 선량을 조절하는 데는 한계가 있기 때문에 낮은 선량 조사를 대비하여 선량감소를 위한 가변형 보조차폐체를 갖추었다.

선량조절용 보조차폐체는 납으로 된 반 원통형

조각 2개를 조립하여 원통형으로 선원주위를 둘러쌀 수 있도록 제작되었다. 보조차폐체는 두께가 30 mm인 납 원통으로 3개가 제작되어 원하는 선량에 따라 보조차폐체를 1개, 2개 내지 3개를 이용하여 선량을 감소시킬 수 있다. 차폐체는 조립식으로 수동으로 이동레일을 따라 이동시킬 수 있다.



Fig 2. The shields of measuring points(A-H) for dosimetry and the shape of the semi-cylinder type.

2. 선량측정방법

1) 화학선량계 (FeSO₄ 용액)

FeSO₄ 용액을 사용하는 Fricke dosimeter (Hugo Fricke와 Edwin J. Hart, 1996)는 용액 제조가 용이하고 ⁶⁰Co 감마선 조사시 용액으로의 전이가 작아서 방사선의 선질에 따른 G값의 변화가 거의 없다는 장점을 가지고 있다. 일반적으로 고선량 측정에 적합하고, 약 4x10²~4x10³ Gy 범위에서는 선량의존성이 적으며 안정성과 재현성이 좋다.

화학선량계를 통한 흡수선량 측정은 방사선이 용액을 통과할 때 물의 방사선 분해에 의해 생성된 H· 및 OH· 등의 유리기와 이들의 반응생성물에 의해 황산 제1철 용액의 Fe²⁺가 Fe³⁺로 산화되는 현상을 이용하는데 이 화학 변화가 흡수된 에너지에 비례한다.

(1) Fricke 용액의 제조

Fricke dosimeter는 3차 증류수로 만들어진 0.784g의 Fe(NH₄)₂(SO₄)₂과 80.89 g의 H₂SO₄ 용액

으로 이루어져 있다(2L 기준).

만일 첨가하는 물의 순도가 떨어지는 경우 NaCl을 추가하는데 유기불순물에 의한 dosimeter의 영향을 둔감하게 하는 작용을 하기 때문에 Fricke dosimeter 용액에 0.1169 g의 NaCl을 추가하여 제조한다. 그러나 NaCl을 가하게 되면 radiation chemical yield rate의 증가를 유발하므로 고선량 (약 10Gy/μs 이상) 측정시에는 NaCl이 Fe³⁺이온의 생성에 영향을 주기 때문에 NaCl을 추가해서는 안 된다 (고성진 등, 2001). 또한 저장해 둔 FeSO₄ 용액은 시간이 지남에 따라서 [Fe₂(SO₄)₃]용액으로 산화가 일어나기 때문에 가장 정확한 측정결과를 위해서는 용액을 사용하기 바로 전에 만드는 것이 바람직하다.

(3) 흡광도(Absorbance) 측정

Fe³⁺의 양은 흡수분광분석법 (absorption spectroscopy)으로 측정하는데 이 방법은 측정이 빠르고 정확하며 특히 저 농도의 Fe³⁺를 포함한 FeSO₄ 용액이나 미량의 용액에서의 측정에도 유리하다는 장점 때문에 많이 활용되고 있으며 특히 Spectrophotometer(SECOMAM Co, UVIKON XL)를 이용하면 선량계 용액 속의 Fe³⁺이온에 대한 분석을 더 쉽게 수행할 수 있다.

분석에 주로 쓰이는 단색광의 파장은 304 nm로 Fe³⁺는 자외선을 흡수하지만 Fe²⁺는 흡수하지 않는다. 따라서 Fe³⁺는 304 nm의 자외선을 특히 강하게 흡수하기 때문에 분광광도계의 파장을 304 nm로 설정하고 흡광도를 측정한다.

단색화 장치를 통과해 나온 단색 파장의 빛은 시료를 통과하여 광전자증배관 검출기에 의해 측정되고 흡광도는 투과된 빛에 대한 입사광의 광도로 나타내며 이 흡광도를 통해 이 수용액 속의 흡수 에너지를 알 수 있다.

(4) 선량 계산

임의의 단일 파장에서 용액에 흡수되는 선량은 광밀도와 molar extinction coefficient에 대한 관계에 따라 다음과 같은 흡수선량식으로 나타낼 수 있다(A. Olszanski 등 2002).

$$D_w = \frac{\Delta OD \cdot R_w^F \cdot k_{vial} \cdot k_{dd} \cdot k_E}{\epsilon \cdot G(Fe^{3+}) \cdot \rho \cdot L}$$

여기서

ΔOD = Fe^{2+} 에서 Fe^{3+} 로의 변화에 의한 흡광도
를 차이,

R_w^F = 같은 가정하에서 대조위치에서 비어 있
는 용기에서 물에서의 흡수선량과 Fricke에서의
흡수선량 비 (^{60}Co 에 대해서 $R_w^F=1.0032$),

K_{vial} = Fricke vial의 벽에 의한 변동요소를 고
려한 보정인자 (^{60}Co 에 대해서 $K_{vial}=1.0000$),

K_{dd} = 바이알의 직경을 지나는 조사 영역의 비
일정함을 고려한 보정인자 (^{60}Co 에 대해서 K_{dd}
=1.0031),

K_E = $G(Fe^{3+})$ 의 에너지 의존성을 고려한 보
정인자 (^{60}Co 에 대해서 $K_E=1.0000$),

$\epsilon \cdot G(Fe^{3+})$ = 열량계의 비교에 의해 결정된
 Fe^{3+} 의 화학적 산물과 분자 소멸계수의 생산
(^{60}Co 에 대해서 $\epsilon \cdot G(Fe^{3+})=3.5060cm^2J^{-1}$),

ρ = 25℃에서 Fricke 용액의 밀도 (ρ
=1.0227×10⁻³ kg/cm³),

L = spectrophotometer에서 측정 cuvette의 길이
(cm) 를 각각 나타낸다.

2) 열형광선량계 (TLD)

(1) KCT-300 소자

열형광선량계는 $CaSO_4:Dy$ TL계열의 소자를
바탕으로 인(P) 화합물을 접착매질로 사용한
KCT-300 이라 명명된 소자이다. KCT-300 소자
는 소량의 P-화합물을 첨가하였기 때문에 이미
상용화 되어 쓰이고 있는 Teflon을 첨가한 $CaSO_4$
:Dy TL 소자에 비하여 감도가 높고 fading 특성
이 좋으며 선량 의존성의 범위가 넓어 개인 선량
계 및 환경 선량계로 매우 유망한 것으로 보고된
바 있다(Jeong Sun Yang 등 2002). 이 소자는 선
량이 30 Gy 이상이 되면 선형영역에서 다소 벗어
나 초선형 양상을 보이지만 포화되기 전까지는
선량에 비례하여 증가하므로 고선량 영역의 선량

측정도 가능한 것으로 예상된다.

(2) 선량 판독

KCT-300 소자를 $Co-60$ 선원으로 조사시킨 후
발생하는 열형광량으로부터 방사 흡수선량을 판
독하기 위해서는 우선 KCT-300 소자의 열형광량
과 흡수선량에 대한 특성 곡선을 얻어야한다. 이
를 위해 먼저 KCT-300 소자를 열처리(annealing)
한 후 한국원자력연구소의 $Co-60$ 표준조사시설을
이용하여 10⁻⁵ Gy부터 10³ Gy 범위에 있는
선량을 조사시켰다. 조사시킨 소자는 fading 효과
를 고려하여 24시간 이상 경과 후 판독하였다.

소자 판독에 이용된 TLD 판독기는 Harshaw
4500으로 소자 판독시의 TTP (Time - Temperature
Profile)는 125 ℃에서 6초간 pre-heating후 20 ℃
/sec의 가열율로 320 ℃까지 상승시키면서 판독
후 320 ℃에서 6초간 annealing하였다. 여기서
125 ℃에서 6초간 pre-heating하는 이유는 실제
선량 평가에는 적용되지 않는 저온 피크의 영향
을 인위적으로 없애기 위함이다.

그림 3은 KCT-300 소자의 특성곡선을 보인 것
이다. 수직축은 발생한 열형광의 강도를, 수평축
은 흡수선량을 가리킨다. 고선량 그림에서 보인
바와 같이 30 Gy 부근에서 선량특성곡선의 기울
기가 약간 변함을 알 수 있으며 그 이후에는 거
의 선형적임을 볼 수 있다.

3) 전리함

전리함은 PTW Farmer-type으로 용적이 0.6
cm³이고 벽물질은 아크릴(PMMA)과 흑연(C)으로

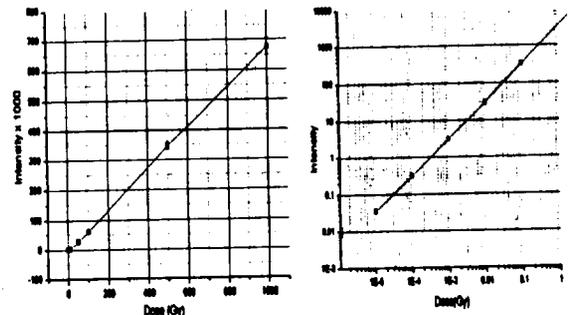


Fig 3. Dose characteristic curve of KCT-300
TLD pallets. High-dose (Left),
Low-dose (Right).

구성되어 있다. 이 thimble type의 전리함은 내부로 공기가 자유롭게 드나들 수 있기 때문에 온도 및 기압에 대한 보정이 필요하다(Gavin Cranmer - Sargison 등 2003). 그리고 인체 등가물질인 아크릴 소재의 케이스에 내장되어 있어서 조사선량을 흡수선량으로 변환할 수 있다.

전리함에 생성된 전하량은 전위계(Electrometer)를 사용하여 측정할 수 있는데 선량을 측정할 때 전리된 공기로부터 전하를 발생시키기 위해서 분극전압은 챔버 안 공기의 부피에 따라 적용된다. 전리함의 응답성은 전압의 크기와 챔버 안의 전기장의 방향에 의존하고 그 장의 방향은 전극 전압과 치료 선량측정에서의 전극에 적용되는데 (ARPANSA, 2005) 이것이 전위계의 기능이다.

(1) 전위계(Electrometer) : Ground referenced electrometers

이 시스템에서 증배관에 입력한 전위계는 비전도를 접지면에 입력한다. 챔버의 수집전하는 증배관의 상호작용에 의해 가상 접지면에서 유지되는 전도 입력과 연결되어진다. 분극전압은 outer shield와 outer electrode에 적용되고 이에 따라 충격 위험이 나타난다. 어떤 전리함은 전기적으로 stem과 연결된 챔버 캡을 가진다. 만약 이 챔버가 ground referenced 전위계로 사용된다면 stem은 또한 충격위험이 일어날 것이므로 짧은 분극전압 공급을 피하기 위해서 접지로부터 이 챔버의 stem을 절연시키는 것이 필수적이다. 따라서 접지 루프를 피하기 위해서는 모든 경우에 stem을 절연하는 것이 바람직하다.

(2) 선량 계산

유효전리체적 A · L과 전하량 Q를 정확히 측정하였다면 전리공기의 기압과 온도를 보정하여 조사선량은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$X [Ckg^{-1}] = \frac{Q(C)}{A \cdot L [m^3]} \cdot \frac{1}{\rho [kgm^{-3}]} \cdot \frac{T(K)}{273.2} \cdot \frac{101.3}{(p - 0.238 p_1) [kPa]}$$

여기서

Q = 측정된 전하량,

A · L = 유효전리체적으로 0.6 cm³,

T = 전리조내의 공기의 절대온도,

P = 측정시의 대기압,

ρ = 표준상태의 공기의 밀도 (1.293 kg/m³),

P₁ = 대기중 수증기의 증기압이다.

4) MOSFET

MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) 선량계는 초기에 공간 방사선 환경에서의 선량 감시를 위해 고안되었다. 이 MOSFET 선량계는 고감도이고 소형이며 실시간 측정이 가능하고 사용하기 쉬운 장점을 가지고 있다.

최근에 이 선량계는 방사선 치료와 진단 분야에서 선량평가와 같은 다양한 의학 분야에서 널리 사용되고 있다. 그리고 감도가 증가함에 따라 이 선량계는 저선량을 포함하는 방사선 방호 분야에 실용적으로 사용되고 있다 (Brian Wang 등 2005).

본 연구에서는 동물 세포와 같은 생체 조직이나 마우스 등의 조사시에 국부적 표면의 선량 측정을 위해서 도입하였다.

(1) 동작원리

MOSFET은 전도채널의 형식에 따라 채널이 구분되며, n-채널 증가형일 경우 게이트전압이 0일 때에는 드레인 전류가 흐르지 않으며 게이트 전압의 증가에 따라 출력전류가 증가한다.

P형기판인 실리콘에는 전류의 자유전자의 수가 매우 적으므로 소스와 드레인 사이의 높은 전압을 가해도 기판의 저항이 너무 크기 때문에 전류가 흐를 수 없다. 그러나 게이트 전압을 가하면 중간의 절연체인 Oxide 때문에 전류가 흐를 수 없다가 기판과 Oxide 경계면에 전자가 모이게 되어 전도채널(Conduction channel)이 형성되어 전류가 통하게 된다.

MOSFET은 0.2 x 0.2 mm 크기의 실리콘칩으로 케이블선 끝부분에 1 mm 두께의 김정 에폭시 로 덮여있다.

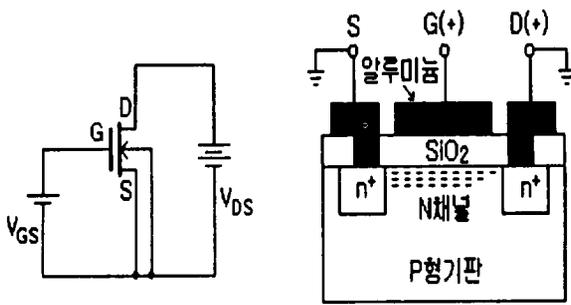


Fig 4. Simplified circuit diagrams of then-channel.

(2) 선량 측정

Calibration은 선량이 정확히 알려진 조건하에 행해져야한다. 이를 위해 표준과학연구원에서 ⁶⁰Co 표준조사시설을 이용하여 실시하였으며 전리함을 통해서 알려진 선량값 50 cGy를 조사하여 각각의 Calibration factor들(CF's)을 구하였다. 이 때 25 cm x 25 cm x 6.5 cm의 폴리스틸렌 팬텀 중심에 MOSFET 선량계를 1 cm 간격으로 고정시킨 후 하전입자평형(CPE)를 확보하기 위해 조직등가물질인 1 cm 두께의 bolus를 선량계 전면부에 부착하여 사용하였고 각 선량계의 정확한 교정인자를 산출하기 위해 20 개의 선량계를 3 회씩 조사하고 그 결과를 평균하였다.

방사선이 흡수됨에 따라 출력전류가 증가하게 되는데 이 선량계는 최대 20,000 mV의 수명을 가지고 있어서 고선량 측정시 급방 소진되어 버리기 때문에 적합하지 않다.

조사 후 측정되는 전압(mV)에 각각의 CF로 나눠주면 선량을 알 수 있다.

$$CF = \frac{MOSFET\ mV\ Reading\ (mV)}{Known\ radiation\ value\ (cGy)}$$

그림 5는 MOSFET AutoSense System에 대한 하드웨어 기능을 간략히 나타낸 그림으로 이 소프트웨어는 CF들과 각 Bias supplies (A~D)에 연결된 각각의 선량계(1~5)의 위치를 정의하여 최대 20개까지 저장할 수 있다.

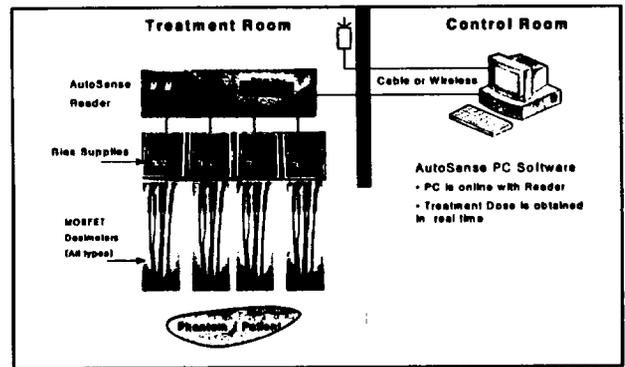


Fig 5. MOSFET AutoSense System Block Diagram.

그림 6은 bolus의 사용여부에 따른 선량값을 비교한 그래프인데 차폐체가 하나일 때 거리에 따른 선량식(그림 12)으로부터 각각의 임의의 거리에서의 선량을 계산하여 얻어낸 데이터의 비율 나타낸 그림이다. 구해진 비율 통해 시료에 따라 bolus를 사용하지 못하더라도 선량을 변환 할 수 있을 것으로 예상된다.

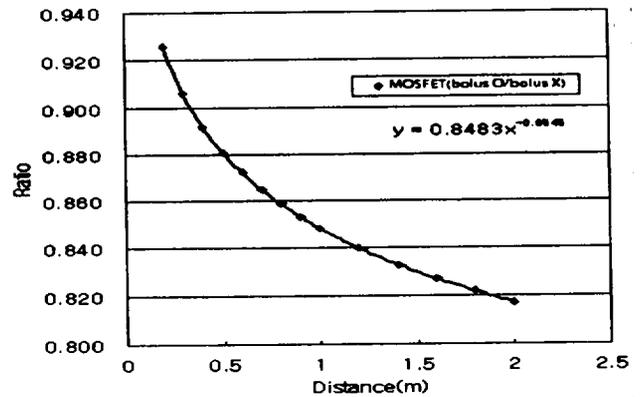


Fig 6. Comparison of dose ratio measured by MOSFET with MOSFET not using the bolus.

3. 실험방법

선원 ⁶⁰Co의 감마상수는 1.32 R·m²/hr/ci 로 400 TBq 점선원으로부터 1 m 떨어진 곳의 이론적 최대 선량률은 약 140 Gy/h로 매우 높다. 따라서 일반적인 선량계로는 측정이 곤란하여 본 연구에서는 흡수선량 측정을 위하여 고선량 측정에 적합한 자체 제조한 화학선량계(FeSO₄)용액과 한국원자력연구소에서 개발한 KCT-300 소자,

Cardinal Health사의 Farmer형 전리함(Model 30013-1264), Thomson Neilsen사의 MOSFET (Model TN-1002RD)을 사용하였다.

길이가 40 cm이고 직경이 약 1 cm인 봉형 선원으로부터 이격 거리에 따른 선량변화를 측정하기 위하여 선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하고 각 지점에서 선원의 중심 높이에 해당하는 위치에 Fricke 선량계 vial 3개, TLD 소자 5개, 전리함(반복 3회 측정), MOSFET(반복 3회 측정)을 배치하였으며, 각각 측정된 값을 평균하였다. 이 과정은 선량조절용 차폐체를 1겹, 2겹, 3겹 설치한 상태에서도 반복하여 차폐체 사용에 따른 선량 분포를 측정하였다.

조사시 선원봉의 하단이 조사실 바닥면으로부터 350 mm정도 상승하게 되어 그 중심에서 선량을 측정할 경우에는 250 mm 높이의 조사대(irradiation table) 위에 300 mm 높이의 선량계 받침대를 설치하고 그 위에 선량계가 위치하도록 하였다. 그림 7은 선원과 선량계의 선량측정 위치를 보여주고 있다.

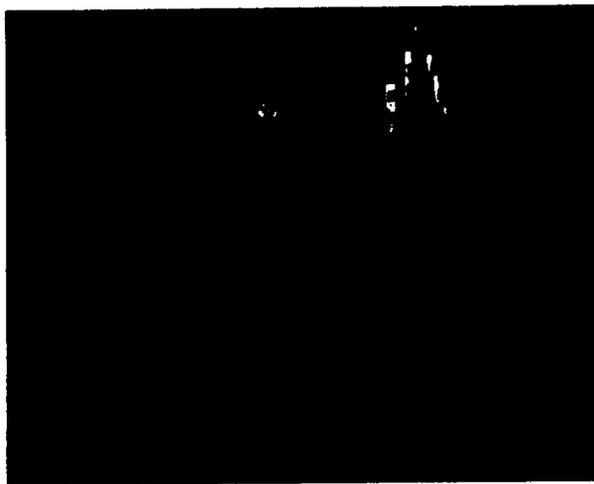


Fig 7. The position of dose measuring point and source.

1) 거리에 따른 선량비교

거리에 따라서 차폐체가 있을 때와 없을 때의 선량을 평가하기 위하여 차폐체별 거리에 따른 선량을 비교하였는데 각각의 선량계를 이용하여 20 cm 간격으로 측정을 하였으며, 조사시간은 1 시간으로 하였다.

2) 전리함에 대한 상대 선량비

실험 결과를 통해 방사선 조사실의 선량평가를 위해서 TLD와 화학선량계를 사용하는 것보다는 전리함을 사용하는 것이 유리하다고 판단되었다. 따라서 전리함의 선량 측정을 가장 정확하다고 볼 때 전리함에 대한 각 선량계의 선량비를 계산하였다.

3) 선량 분포 지도 작성

조사실 내 특성을 고려한 전체적인 선량분포를 파악하기 위해 조사실 내부를 x, y축으로 잡고 z축을 선량으로 하는 3차원의 그래프와 실험을 통해 측정된 선량값을 기준으로 하여 각 지점들 사이의 선량값까지 함께 고려하여 같은 선량을 받는 지점들을 연결한 등고선 형태의 선량 분포 지도를 작성하였다.

4) 방사선량의 Locality (등방성 대조)

선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하였을 때 벽과의 거리에 따른 산란이나 차폐체 자체의 불균일성 등으로 인해 모든 선량값을 균일하게 얻을 수는 없다.

따라서 조사실 내 바닥에서 55 cm 높이의 평면을 각각 8지점으로 나누어 선원으로부터 1 m 거리에서 1시간 조사하였을 때의 선량 분포를 조사하였다. 또한 이 때 같은 조건에서 차폐체를 사용하지 않은 경우와 1, 2 및 3겹을 사용했을 경우를 구분하여 측정하였다.

5) 시간에 따른 선량률의 변화

전리함 선량률을 기준으로 거리와 시간(^{60}Co 의 반감기 고려)에 따른 선량률의 변화식을 나타내었다. 이를 통해 선량 평가인을 기준으로 방사선 조사실의 조사 가능한 선량률의 범위를 구하였다.

6) 시료 용기에 따른 선량비교

(1) 동물(마우스)의 경우

동물에 방사선을 조사시킬 때 용기 속에 위치한 부위별에 따른 선량을 조사하기 위하여 쥐의 머리, 등 및 배 부위를 중심으로 각 위치별 선량을 비교하였다.

(2) 동물세포의 경우

동물세포에 대한 방사선 조사시 96-well plate 또는 50이나 15 ml 용량의 test tube를 많이 사용하는데 각 용기의 위치나 시료의 용량에 따른 선량의 차이가 발생하는지를 조사하였다. 측정은 96-well plate의 경우는 그림 19에 표시된 5번 위치를 중심으로 400초간 조사시켰을 때의 선량을, test tube에 시료를 조사시킬 때는 시료 10 ml를 똑같이 넣은 상태에서 400초간 조사시켜 선량값을 비교검토하였다.

(3) 선원의 높이에 따른 선량 측정

조사실의 선원은 구동시 선원봉의 하단이 조사실 바닥면으로부터 350 mm정도 상승하게 되어 250 mm 높이의 조사대(irradiation table) 위에 300 mm 높이의 선량계 받침대를 설치하고 그 위에 선량계가 위치하도록 하여 선원의 중심에서 선량을 측정하였다. 이 선원 중심을 기준으로 조사용 선량계 받침대의 높이를 변화시키면서 높이에 따른 선량을 측정하였다.

측정 결과 및 분석

1. 거리에 따른 선량 비교 (차폐체별)

그림 8~12는 각각 선량조절용 차폐체를 사용하지 않은 경우, 차폐체를 각각 한 겹, 두 겹, 세 겹 사용한 경우에 대한 선원과 선량계간의 거리에 따른 선량의 변화를 나타낸 그림이다. 각 경우 측정된 데이터를 최소자승법으로 연결하는 2차함수의 추세곡선으로 나타내었다. 거리(x)와 선량(y)간의 함수는 선원의 형태가 점선원이 아니기 때문에 정확하게 거리의 역자승의 법칙은 성립되지 않지만 비교적 거리의 제곱에 반비례하는 형태를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이때 조사시간은 1시간이었다.

차폐체를 사용하지 않은 경우에서 보듯이 화학 선량계는 선량이 약 600 Gy 이상에서는 포화상태가 되어 측정이 불가능하였으며 열형광 선량계에서는 약 1,200 Gy까지는 측정이 가능하였으나 그 이상에서는 부정확한 값을 보였다.

그림 12의 MOSFET의 경우 전리함과 비슷한 추세곡선을 나타내었으나, 대체적으로 전리함보다

높은 값을 보였다.

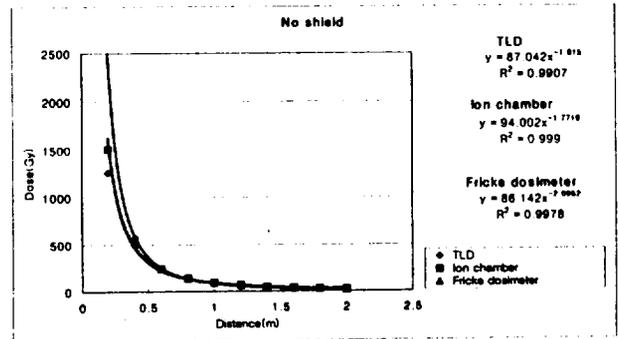


Fig 8. Comparison of dose distributions measured by different dosimeters with no shield.

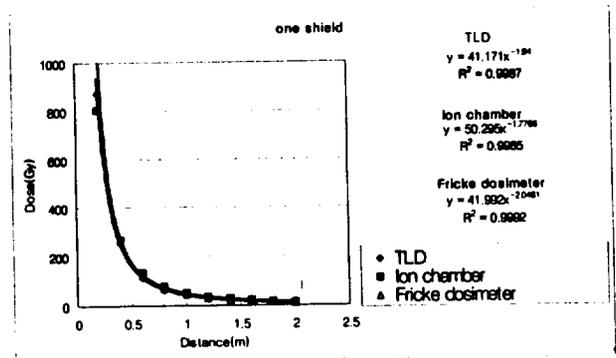


Fig 9. Comparison of dose distributions measured by different dosimeters with one shield.

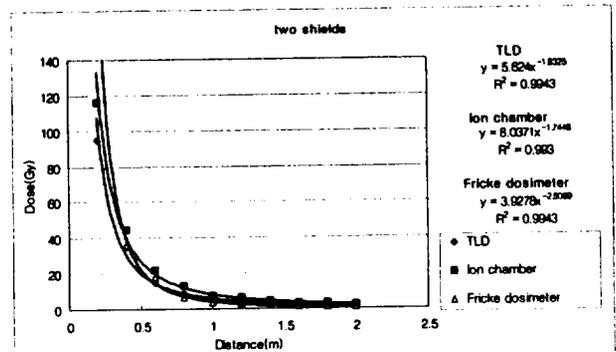


Fig 10. Comparison of dose distributions measured by different dosimeters with two shields.

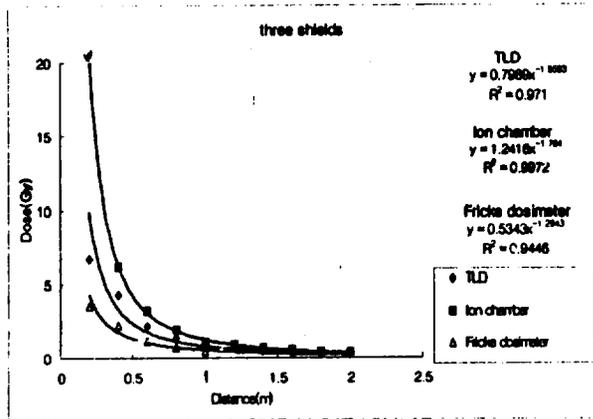


Fig 11. Comparison of dose distributions measured by different dosimeters with three shields.

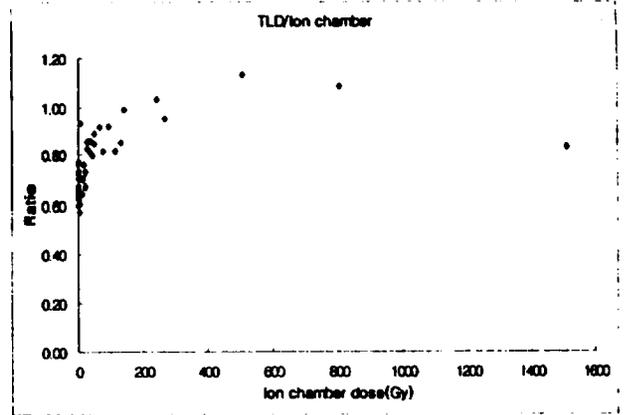


Fig 13. Comparison of dose ratio measured by TLD with Ion chamber.

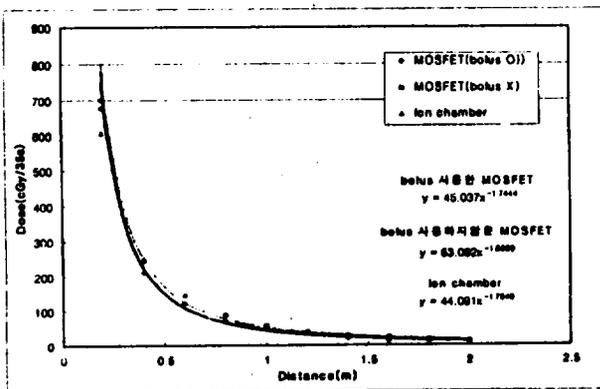


Fig 12. Comparison of dose distributions measured by MOSFET dosimeter and ionization chamber with one shield.

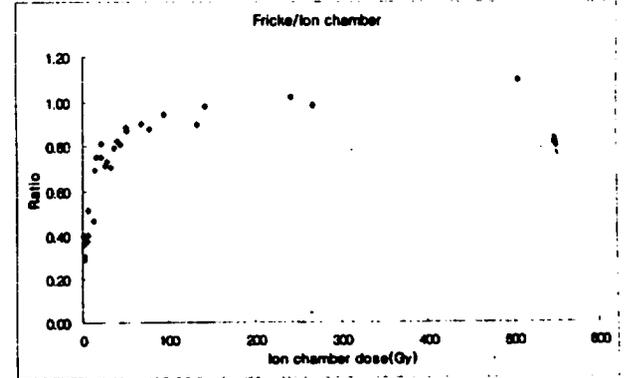


Fig 14. Comparison of dose ratio measured by Fricke dosimeter with Ion chamber.

2. 전리함에 대한 상대 선량비

그림 13~15는 선량 측정값을 오류차순 정리하여 전리함에 대한 각 선량계의 선량비를 계산한 것이다. 전리함의 선량 측정값을 가장 정확하다고 볼 때 열형광 선량계의 경우 150~250 Gy 영역에서, 화학선량계의 경우 150~350 Gy 범위에서 오차가 ± 2~5 % 이내로 비교적 정확하게 나타났으며, 전반적으로 열형광선량계와 화학선량계는 실제보다 낮은 측정값을 나타내었으며 선량 조절용 차폐체를 두 겹, 세 겹 이용하여 저선량 영역으로 갈수록 상대적인 편차가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 저선량 영역에서는 화학선량계가 열형광선량계보다 더 큰 오차를 보였다. MOSFET의 경우 전반적으로 선량이 전리함보다 높은 값을 보였다.

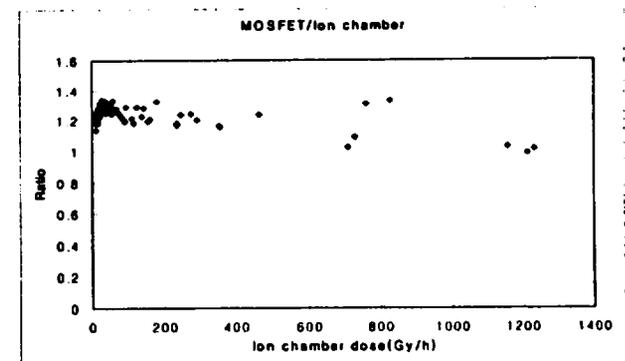


Fig 15. Comparison of dose ratio measured by MOSFET dosimeter with Ion chamber.

3. 선량분포지도 작성

선량분포지도를 그릴 때 SURFER 7.0 이라는 등고선을 그리는 프로그램을 이용하였다. 이 때 실험을 통해 측정된 선량값들을 입력하여 이를

기준으로 하여 각 지점들 사이의 선량값들도 함께 고려하여 같은 선량을 받는 지점들을 연결하였다. 최적의 과정을 통해 얻어낸 선량 분포 지도는 그림 16과 같다. 여기서 지도의 왼쪽 아래 부분은 차폐체의 레일이 있는 곳이라 선량을 측정할 수가 없어서 찌그러진 원의 형태를 보이고 있다.

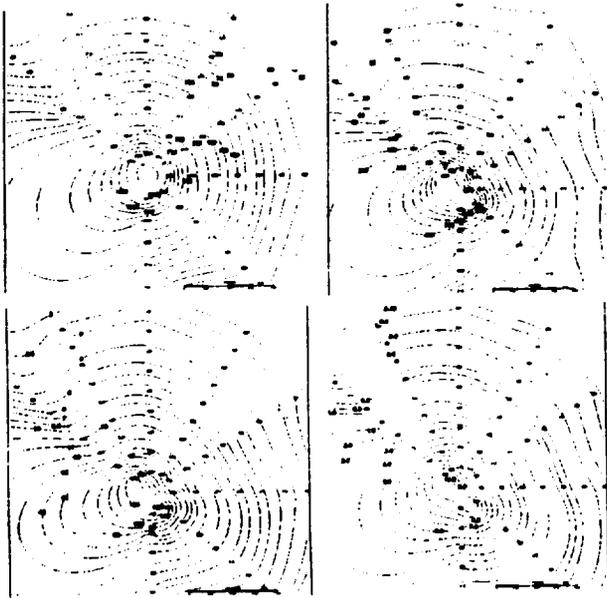


Fig 16. Dose curves of absorbed dose rate distribution in the irradiation room (Gy/hr) (2005.10.26 기준)

4. 방사선량의 Locality (동방성 대조)

선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하였을 때 벽과의 거리에 따른 산란이나 차폐체 자체의 불균일성 등으로 인해 모든 선량값을 균일하게 얻을 수는 없다.

그림 17은 조사실 내 바닥에서 55 cm 높이의 평면을 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 225°, 270°의 8 지점으로 나누어 선원으로부터의 1 m 거리에서 1시간 조사하였을 때 각각의 선량을 비교하였다. 이 때 차폐체에 따라서도 측정하였는데 차폐체의 조립부분의 틈에서 빠져나온 선량의 영향으로 30°, 60° 부분과 225°, 270° 위치에 더 높은 선량률을 보였다.

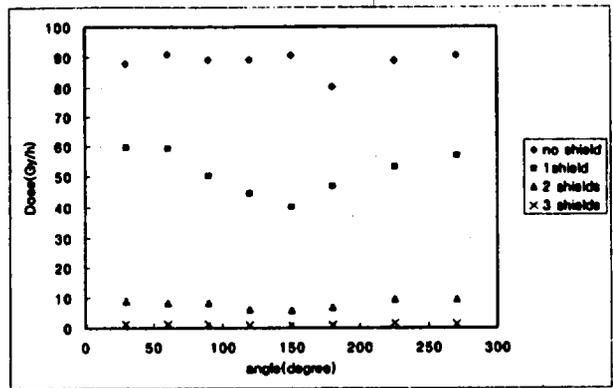


Fig 17. Locality of dose rate distribution

5. 시간에 따른 선량률의 변화

실험 결과를 통해 방사선조사실의 선량평가를 위해서 TLD와 화학선량계를 사용하는 것보다는 전리함을 사용하는 것이 유리하다고 판단되었다.

전리함의 경우, 거리에 따른 선량률 감소 추세 곡선의 지수가 -1.7까지는 같은 점으로 미루어 정확한 것으로 판단된다. 전리함 선량률을 기준으로 거리와 시간에 따른 선량률의 변화는 다음과 같이 표시된다.

차폐체가 없는 경우 :

$$D = 94 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.772} \text{ (Gy/h)}$$

차폐체를 1겹 사용한 경우 :

$$D = 50.3 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.771} \text{ (Gy/h)}$$

차폐체를 2겹 사용한 경우 :

$$D = 8 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.745} \text{ (Gy/h)}$$

차폐체를 3겹 사용한 경우 :

$$D = 1.24 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t-t_0}{1935}} x^{-1.764} \text{ (Gy/h)}$$

위에서 $t-t_0$ 는 선량평가를 실시한 기점 ($t_0 = 2005$ 년 3월 30일)부터 현재까지 경과한 일수이다. 선량 평가일을 기준으로 방사선 조사실의 조사 가능한 선량률의 범위는 표 2에 나타났다.

선량률의 최대값은 차폐체를 사용하지 않은 경우 선원 중심에서 20 cm 떨어진 곳에서 1,628 Gy/h이고, 최소값은 차폐체를 3 겹 사용한 경우 2 m 떨어진 곳에서 0.37 Gy/h이다. 이 선량률 범

Table 1. Dose rate range of the irradiation facility

선량 조절용 차폐체 사용	선량률 최대값(Gy/h) (선원으로부터 20cm 위치)	선량률 최소값(Gy/h) (선원으로부터 2m 위치)
차폐체 사용하지 않은 경우	1,628	27.5
차폐체 1겹 사용한 경우	878.3	14.6
차폐체 2겹 사용한 경우	132.7	2.3
차폐체 3겹 사용한 경우	21.2	0.37

위에서는 차폐체 사용과 거리 조절을 통하여 선량률 조절이 가능하다.

6. 조사 시료(용기)에 따른 선량비교

1) Mouse irradiation 실험

선원으로부터 1 m 떨어진 지점에서 400 초간 조사했을 때, 10.85 Gy의 선량을 얻을 수 있다. 그림 21에서 보는 바와 같이 쥐의 머리, 등, 배의 각각의 선량을 측정하였을 때 표 2에서 보는 것처럼 오차가 0.2 % 이내로 거의 차이를 보이지 않았다

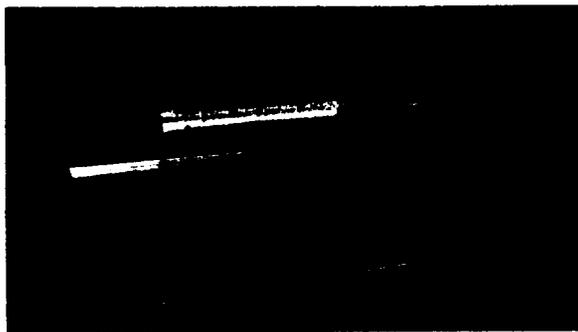


Fig 18. Dosimetry for the mouse irradiation

Table 2. Dose rate of dosimetry for mouse irradiation.

	Dose (Gy/400s)	Average (Gy/400s)	STDE V	RSD(%)
point 1-Head	10.83	10.85	0.02	0.22
point 2-back	10.87			
point 3-abdomen	10.86			

2) 다른 크기와 부피의 조사시료용기

그림 19의 왼쪽과 같은 12.5 cm x 8.3 cm 크기의 well plate의 경우, 5번 지점을 중심으로 조사시켰을 때 측정된 선량 범위는 9.44~11.47 Gy로, 상대적 선량비는 표 3에서 보는 것처럼 약 1~13% 까지의 분포를 보였다.

그리고 그림 19의 오른쪽과 같은 50 ml와 15 ml의 test tube에 각각 10 ml의 세포시료를 취했을 때 각 지점에서의 선량값을 비교해 보면 표 5와 같다. 15 ml 용기의 선량에 비해 50 ml의 용기의 선량이 더 큰 오차를 보였다. 위 실험을 통해 시료나 시료용기의 높이차보다 너비의 차가 선량에 더 영향을 미친다는 것을 알았다.

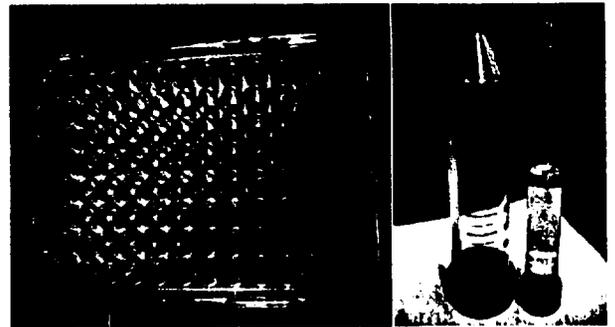


Fig 19. Well dish for different distances of dosimetry (Left) Different volume tubes of dosimetry (Right).

Table 3. Relative dose-rate variation along the size of well plate.

1.05	1.06	1.04
0.99	1.0	0.92
0.94	0.95	0.87

Table 4. Comparison of dose-rate in tubes of the different volume.

	Dose (Gy/400s)	Average (Gy/400s)	STDEV	RSD (%)
50ml 앞벽-1.7cm	11.21	10.76	0.41	3.83
50ml 뒷벽+1.7cm	10.41			
50ml 높이+1.8cm	10.66			
15ml 앞벽-1.0cm	10.86	10.62	0.20	1.91
15ml 뒷벽+1.0cm	10.51			
15ml 높이+6.5cm	10.50			

3) 선원의 높이에 따른 선량

선원의 높이에 따른 선량비교 측정 결과 또한 조사대의 높이를 150~500 mm로 변화시켰을 때, 그림 20에서 보는 것처럼 300 mm 높이에서 가장 높게 나왔다.

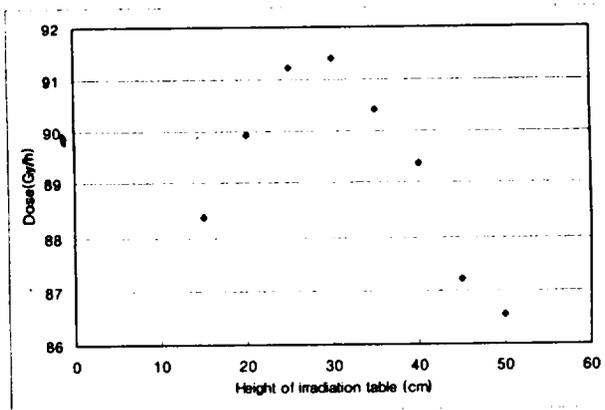


Fig 20. Dose rate distribution along the height of the source.

결 론

본 연구는 선량계를 통한 측정값을 바탕으로 2004년 2월 도입된 방사능이 400 TBq인 제주대학교 방사선응용과학연구소의 ^{60}Co 감마선 조사실의 정확한 선량분포 지도를 작성하기 위해 수행되

어졌다.

흡수선량 측정을 위하여 자체 제조한 화학선량계(FeSO_4)용액과 한국원자력연구소에서 개발한 KCT-300 소자, Farmer형 전리함 및 MOSFET 선량계를 사용하였다.

선량측정결과 화학선량계의 경우 선량이 600 Gy 이상에서는 포화상태에 달하여 측정이 불가능하였으며, 선량이 1 Gy 이하에서도 측정이 불가능하였다. 전반적으로 TLD와 화학선량계는 150~300 Gy 영역에서 오차가 5% 이내로 정확한 선량값을 보였으나, 차폐체를 이용하여 저선량 영역으로 갈수록 상대적인 편차가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 MOSFET 선량계는 최대 20,000 mV의 수명을 가지고 있어서 고선량 측정시 급방 소진되어 버리기 때문에 동물 세포와 같은 생체 조직이나 마우스 등의 조사시에 국부적 표면의 선량 측정에 유리하였다.

일반적으로 전리함의 선량측정을 가장 정확한 것으로 간주할 수 있으므로 두 선량계 모두 실제보다 낮은 값을 보였고, MOSFET 선량계 또한 전반적으로 전리함보다 높은 값을 보였다.

따라서 전리함 선량률을 기준으로 하고, ^{60}Co 의 반감기(5.26년)를 고려하여 거리와 시간에 따른 선량률의 변화식을 구하였다. 이 식에 따라 선량평가일을 기준으로 하여 차폐체의 사용과 거리의 조절을 통해 조사 가능한 선량률의 범위는 0.37~1,628 Gy/hr 임을 알 수 있었다.

그리고 선원을 중심으로 동일한 간격의 동심원을 조사대에 표시하였을 때 조립식 차폐체 자체의 불균일성으로 인해 틈이 나 있는 쪽 선량값이 높게 나타나서 같은 동심원 위치의 모든 선량값을 균일하게 얻을 수는 없었다.

이렇게 얻어진 측정값을 통해 작성되어진 선량분포 지도를 바탕으로 하여 제주대학교 방사선응용과학연구소의 조사시설이 여러 연구분야에 더 많이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- A. Dodbiba, I. Stamo and A. Kraja, August 25-29, 2003, "Irradiation of wheat and ornamental plant seeds in the GU-3 gamma irradiator, BPU-5", Fifth General Conference of the Balkan Physical Union, Vrnjačka Banja, Serbia and Montenegro.
- A. Olszanski, N. V. Klassen, C. K. Ross and K. R. Shortt, 2002, "The IRS Fricke Dosimetry System", PIRS-0815, *Ionizing Radiation Standards Institute for National Measurement Standards National Research Council*, Ottawa, Ontario. 61 pp.
- ARPANSA by D Butler, 2005, Specifying the polarity of the polarizing voltage of ionization chamber, IRS section, Yallambie, 1st edition.
- Brian Wang, X. Geoge Xu and Chan-Hyeong Kim, 2005, "Monte carlo study of MOSFET dosimeter characteristics : dose dependence on photon energy, direction and dosimeter composition", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol.113, No.1, pp. 40-46
- C.C.Yui, S.S.McClure, B.G.Rax, J.M.Lehman, T.D.Minto, M.D.Wiedeman, 2002, "Total dose bias dependency and ELDRS effects in bipolar linear devices", *2002 IEEE Radiation Effects Data Workshop Record*, pp. 131-137
- Gavin Cranmer-Sargison, Wayne Beckham, Mike Roney, 2004 "PTW-Freiburg ionization chamber and electrometer characterization", *Canadian undergraduate physics journal*. Vol.2, issue.2
- Hugo Fricke and Edwin J. Hart, 1996, *Chemical Dosimetry in Radiation Dosimetry* edited by F. H. Attix and W. C. Roesch, 167-239 (Academic Press, New York)
- J. Farkas, "Studies on Low-Dose Irradiation of Prepackaged Prepared Vegetables". IAEA, Progress Rep. Time period covered: 1 April 1997 - 1 February 1998.
- Jeong Sun Yang, Doo Young Kim, Jang Lyul Kim, Jung Il Lee, Bong Whan Kim, Si Young Chang, Jae Woo Park, 2002, "Development of Phosphorous-compound $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (KCT-300) TL Pellets", *J. Korean Nucl. Soc.*, Vol. 34, No. 2.
- Jie-Young Song, et al. 2003, "Rasioprotective Effects of Ginsan, an Immunomodulator", *Radiation Research* 159, pp.768-774.
- K. Farah, T. Jerbi, F.Kuntz, A. Kovacs, 2005, "Dose measurements for characterization of a semi-industrial cobalt-60 gamma-irradiation facility"
- 고성진, 김승국, 노경석, 박명환, 안봉선, 2001, 방사선계측학, 청구문화사, pp.79-97, 211-216
- Meixu Gao, Nov. 24, 2003, "Status of food irradiation in China", *Proceedings of Korea-China Joint Symposium on Nuclear Agriculture and Life Science*, Applied Radioisotope Institute of Cheju National University.
- R. Arora, et. al, 2003, "Radioprotection by plant products: present status and future prospects" *Phytotherapy Research* 19, pp.1-22.
- T.D Naquin, R.C. Bhatt, G.R. Kahles, and D.M. Mckown, 2001, "A Low Gamma Dose Rate Cobalt-60 Facility", *Radiation Protection Management*, Vol.18. No.2. pp. 31-36
- W.Y.Park et. al, 2002, "Gene Expression Profiling on Radiation Responses" *TRANSCRIPTOME 2002: From Functional Genomics to Systems Biology*, March 10-13, 2002, Seattle, Washington, USA.